

MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELÉS A FENOLÓGIAI CIKLUSBAN BEKÖVETKEZŐ VÁLTOZÁSOK SZOLGÁLATÁBAN

Kern Anikó , Lichtenberger János

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport
e-mail: anikoc@nimbus.elte.hu, lityi@sas.elte.hu

Bevezetés

A szárazföldi bioszféra érzékenyen reagál a környezeti feltételek változékonyságára illetve módosulására, amelynek számos megnyilvánulási formája van. Ezek közül a leglátványosabbak azok a változások, amelyek a periodikusan változó életjelenségekhez köthetők. A növényfenológia tudományága foglalkozik az időjárás hatására bekövetkező, meghatározott sorrendiséget követő növényi jelenségek vizsgálatával. A fenológiai megfigyelések rögzítik a rügyfakadás idejét, a levélzet teljes kifejlődésének időpontját, a virágzás idejét, az őszi lombhullás kezdetét, illetve végét, és más jelenségeket. Mivel a növényzet működése szoros kapcsolatban áll a környezeti változók szezonálisával, ezért a növényi életfázisok fenológiai ciklusában történő eltolódás egyértelmű jele a környezeti hatásokban beálló változásoknak.

A globális környezeti változások (elsősorban a melegeedés, a csapadékviszonyok megváltozása és a növekvő légköri szén-dioxid koncentráció) fenológiára gyakorolt hatásának vizsgálataként számos tanulmány számol be a szárazföldi vegetáció korábban kezdődő rügyfakadásáról és zöldüléséről, mely az utóbbi évtizedek változásainak eredményeként világszerte megfigyelhető (Myneni et al., 1997; Menzel et al., 2006; Jong et al., 2011, 2012; Zhu et al., 2016). Az elsősorban (de nem kizárólagosan) a meteorológiát jelentő abiotikus hatásokon túl azonban jelentős szerep jut a biotikus hatásoknak is, mint például kártevők, gombák, fertőzések, stb. A fenológián belüli változások kölcsönhatásban állnak a produkcióval, ezért a növényfenológia pontos leírása alapvető fontosságú, és segítséget jelenthet a jövőre vonatkozó előrejelzések készítésében is.

A fenológia megfigyelésének lehetőségei - a műholdas távérzékelés szerepe

Számos módszer született a fenológiai ciklusban bekövetkező változások detektálására, mint például (1) egyed-szintű *in situ* fenológiai megfigyelések, (2) a növényi produktivitás műholdas távérzékelés útján történő meghatározása, és (3) a légköri szén-dioxid koncentráció monitorozása, mely a fotoszintézis hatására bekövetkező szénfelvétel időzítéséről ad információt (Cleland et al., 2007).

A nagyobb térséget lefedő fenológiai tanulmányok meghatározó eszköze a passzív műholdas távérzékelés, mely mind térben, mind időben folyamatos mérési adatokat biztosít, a felszín által visszavert napsugárzás mérése alapján. Habár a vegetáció optikai tartományú megfigyelése akadályokba ütközik felhők jelenlétekor, az egyes fenofázisok nem megkülönböztethetők műholdas adatok alapján, továbbá a térbeli felbontás jelentősen meghatározza az adatok reprezentativitását (a felszíntípusok és növényfajok térbeli elhelyezkedésének megfelelően), mégis a műholdas távérzékelés egy páratlan lehetőséget kínál a globális és időben folytonos megfigyelésekre. Az adatokból származtatott vegetációs indexek jól alkalmazhatók a szélsőséges időjárási események vegetációra gyakorolt hatásának vizsgálatához is. A műholdas távérzékelés továbbá megfelelő eszköz arra is, hogy a meteorológiai feltételek és a növényzet növekedésében létrejövő változások közötti kapcsolatot feltárhassuk és leírhassuk.

A legfontosabb távérzékelési eszközök a vegetáció monitorozásához

A vegetáció megfigyelésére számos különböző, eltérő tér- és időbeli felbontást biztosító szenzort helyeztek el a műholdakon az elmúlt évtizedekben, melyek közül a legkiemelkedőbb és napjainkban is aktív szenzorokat az *1. táblázat* foglalja össze. Ezek közül az egyik legfigyelemreméltóbb a NOAA meteorológiai műholdsorozat AVHRR szenzora, melyek 1979 óta biztosítanak folyamatos napi szintű globális 1,1 km × 1,1 km felbontású méréseket. Ennek a szenzornak a küldetése azonban nem ért véget a 2009-ben felbocsátott NOAA-19 műhoddal, hiszen időközben elhelyezésre került az európai MetOp műholdak fedélzetén is, hogy a létrejött egyedülálló és megismételhetetlen adatsor időbeli folytonosságát biztosítsák.

1. táblázat: A vegetáció monitorozása szempontjából legfontosabb, napjainkban is aktív műholdas optikai szenzorok és tulajdonságaik.

Optikai szenzor	Műhold	Felbocsátás éve(i)	Legkisebb térbeli nadírbeli felbontás	Időbeli felbontás
AVHRR	NOAA 6-19	1979-2009	1100 m × 1100 m	napi
MODIS	Terra & Aqua	1999, 2002	250 m × 250 m	napi
VIIRS	SNPP & JPSS-1	2011, 2017	371 m × 387 m	napi
Vegetation	SPOT 4-5	1998, 2002	1150 m × 1150 m	napi
ETM+	Landsat-7	1999	15 m × 15 m	16 naponkénti
OLI	Landsat-8	2013	15 m × 15 m	16 naponkénti
MSI	Sentinel-2A&B	2015, 2017	10 m × 10 m	10 naponkénti
SEVIRI	MSG 1-4	2002-2015	1000 m × 1000 m	15 percenkénti

A szintén napi lefedettséget biztosító 36 csatornás MODIS szenzort a látható tartományban finomabb felbontású (akár 250 m × 250 m) mérésein túl annak nagy sugárzási érzékenysége, precíz georegisztrálása és magas kalibrációs pontossága teszi különleges és értékes adatforrássá 1999 óta. Habár MODIS szenzorból összesen kettő került felbocsátásra az EOS-AM1 (Terra) és az EOS-PM1 (Aqua) műholdak fedélzetén, melyek tervezett élettartalma 6 év volt, a két szenzor a mai napig megfelelő minőségű napi és globális lefedettségű adatokat biztosítanak, előreláthatóan 2022-ig, mellyel a létrejött, a kor tudásának kiválóan megfelelő és utánozhatatlan adatsorokat a földfelszíni és a légköri vizsgálatokban számtalan különböző területen nagy sikerrel alkalmazzák.

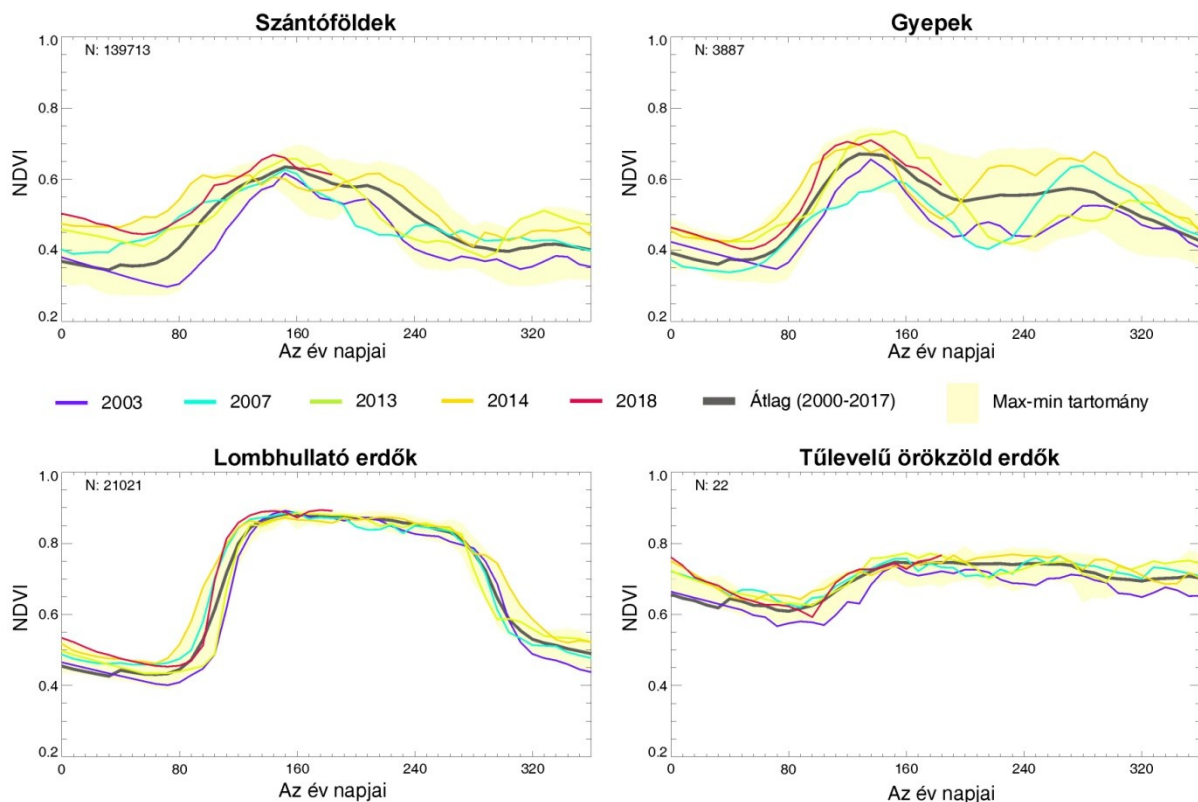
A kvázipoláris meteorológiai műholdakon elhelyezett folytatás nélküli optikai szenzorokat (mint az AVHRR és MODIS) a részben korszerűbb VIIRS követte a 2011-ben pályára állított amerikai „áthidaló”-műhold, a Suomi-NPP fedélzetén. Bár a VIIRS kevesebb (22) csatornával rendelkezik, mint a MODIS, mégis sok szempontból egy fejlettebb eszköz a földfelszínre és a légkörre vonatkozó mérések tekintetében. Az amerikai kvázipoláris meteorológiai műholdak jövőjét képező JPSS sorozat első tagját (JPSS-1), a más néven NOAA-20 elnevezésű műholdat 2017-ben bocsátották fel, fedélzetén a Suomi-NPP (SNPP) műholdon már kipróbált VIIRS optikai leképező műszerrel, mely így a VIIRS adatok folytonosságát fogja biztosítani a közeljövőben.

Fontos még megemlítenünk az előzőekhez hasonló (pár száz métertől ~1 kilométerig terjedő) térbeli felbontású SPOT műholdak Vegetation szenzor adatait (1998-), az OrbView-2 SeaWIFS adatait (1997–2013), és az ENVISAT MERIS (2002–2012) adatait. Ezeken kívül nagy jelentőséggel bírnak a bár ritkább időbeli felbontású, de finomabb térbeli felbontást biztosító szenzorok, mint az amerikai Landsat sorozat TM (1982-), ETM+ (1999-) és OLI szenzora (2013-), vagy az európai Sentinel sorozat MSI szenzora (Sentinel-2A&B; 2015- és 2017-). Bár manapság csábító a korszerű és nagyfelbontású Sentinel adatok használata, ne felejtsük el, hogy szemben az AVHRR vagy a MODIS adatokkal azok egyelőre még nem biz-

tosítanak kellő hosszúságú archívumot, mely az évek közötti különbségek feltárásához elengedhetetlen.

Természetesen a geoszinkron műholdak adatai is alkalmasak lehetnek (mint például az MSG műholdak SEVIRI sugárázmérője) a vegetáció megfigyelésére, azonban esetükben, az eltérő geometriai viszonyokból adódóan, más kihívásokkal kell megküzdenünk. (Pl. változó megvilágítási, és a nadírtól távolodva jelentősen változó geometriai körülményekkel, romló térbeli felbontással). Ennek köszönhetően világszerte elsődlegesen a kvázipoláris műholdak adatait részesítik előnyben a vegetáció monitorozásában.

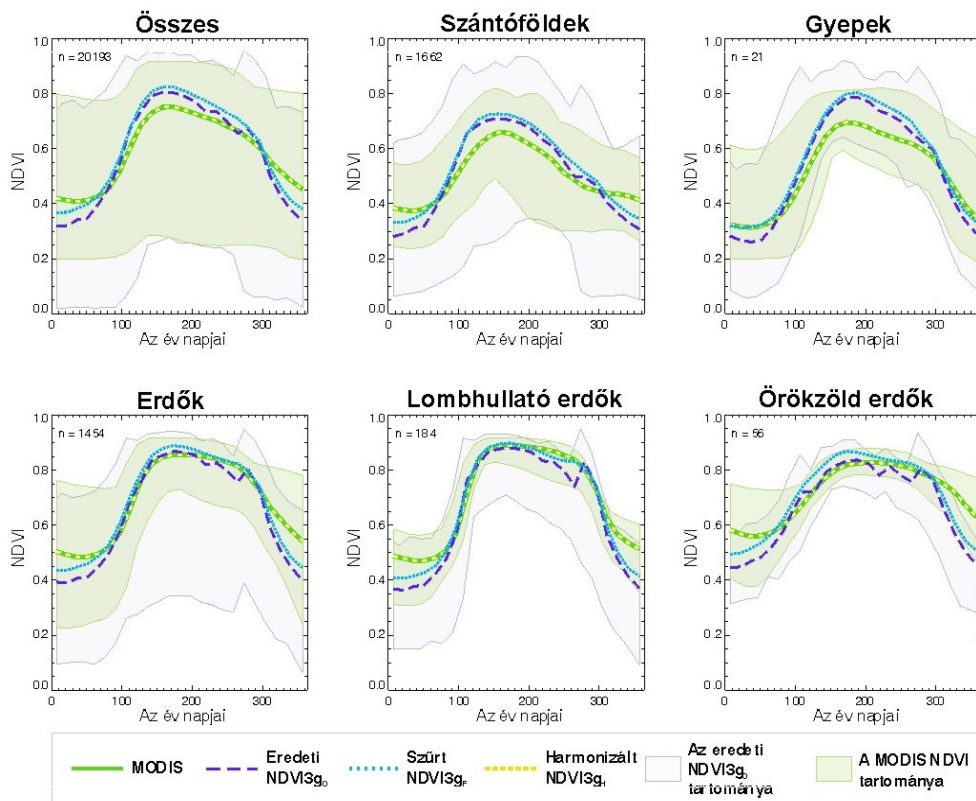
A távérzékeléssel nyert adatokból a mérési csatornák kombinálásával különböző vegetációs indexeket hozhatunk létre, melyekből a növényzet állapotára, produktivitására és fenológiai ciklusára jellemző információt nyerhetünk. Ezek közül az egyik legismertebb az ún. NDVI (*magyarul Normalizált Vegetációs Index*), mely a vegetációra jellemző, a látható és közeli infravörös tartományban megfigyelhető eltérő sugárzás-visszaverésen alapul. Mivel a felhőmentes légkörön áthaladó sugárzás két fő hullámhosszfüggő fizikai folyamat (gázmolekulák és aeroszol részecskék általi szórás és elnyelés) gyengítésének van kitéve, ezért az NDVI-t a légkör sugárázmódosító hatásának leválasztásával célszerű előállítani. Az így előállított NDVI adatsorok a hosszabb időskálán bekövetkezett, nagyobb térségre vonatkozó változások tanulmányozásához az elérhető egyik legjobb adatforrásnak számítanak. Az 1. ábrán magyarországi szántókra, gyepekre, lombhullató és örökzöld erdőkre vonatkozó átlagos MODIS NDVI profilok láthatók éves bontásban néhány kiválasztott évre (ahol a 2018-as évre vonatkozó adatsor még nem teljes).



1. ábra: Országos átlagos MODIS NDVI menetek Magyarországra.

A leghosszabb adatsort biztosító AVHRR esetén összesen 9 AVHRR szenzor adatának eltérő homogenizálási módszerekkel történő szintéziséből több különböző NDVI adatsor született az elmúlt évtizedben, melyek közül az egyik legkiemelkedőbb az 1982–2013 közötti időszakot lefedő globális GIMMS NDVI3g adatsor (Pinzon & Tucker, 2014).

Annak ellenére, hogy az $1/12^\circ \times 1/12^\circ$ térbeli és 15 napos időbeli felbontású konzisztens GIMMS NDVI3g adatsor pótolhatatlan a lefedett időszak miatt, az adatsorban hibák továbbra is maradnak, melyek óvatosságra intenek bizonyos következtetések levonásakor. Az adatsor Közép-Európai régióra vonatkozó javításaként ezért létrehoztuk a MODIS adatokkal korrigált NDVI3g változatot (Kern et al., 2016b), mely az Interneten is elérhető (http://nimbus.elte.hu/NDVI_CE/). A 2. ábrán a 2000–2013-as időszakra vonatkozó sokéves átlagos NDVI menetek láthatók mind az eredeti és a korrigált GIMMS NDVI3g, mind pedig a korrigálás alapjául szolgáló MODIS adatok alapján (Kern et al., 2016b).



2. ábra: Sokéves átlagos MODIS és GIMMS NDVI menetek a Kárpát-medence különböző felszíntípusaira (2000–2013).

Az ELTE műholdvevő-állomása

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Lágymányosi Campusához tartozó ún. Északi Tömb tetején 2002 óta üzemel az a műholdvevő-állomás, mely segítségével lehetőség nyílt mind a plazmaszféra vizsgálatára készített műholdas szenzorok, mind pedig a meteorológiai és környezeti kutatóműholdak mérési adatainak közvetlen vételére (Ferencz et al., 2003). A meteorológiai műholdak (mint az amerikai NOAA műholdsorozat és a kínai FengYun műholdak) adatainak vételén túl az állomást 2004 után az amerikai Terra és Aqua műholdak MODIS szenzor multispektrális adatainak közvetlen vétele tette különlegessé és a térségben egyedülállónak (Timár et al., 2006). A kvázipoláris műholdak adatainak vétele mellett, az európai geoszinkron Meteosat műholdak adatainak vétele 2007 óta szintén folyamatos.

A legfrissebb, 2018-as fejlesztéseknek köszönhetően azonban lehetővé válik, hogy további kvázipoláris meteorológiai műholdak adatai is elérhetővé váljanak, mint a Suomi-NPP és a legújabb JPSS-1 (NOAA-20), kiegészítve ezzel az elérhető adatok forrását és a potenciális alkalmazások körét.

A Föld felszínére vonatkozó vizsgálatok

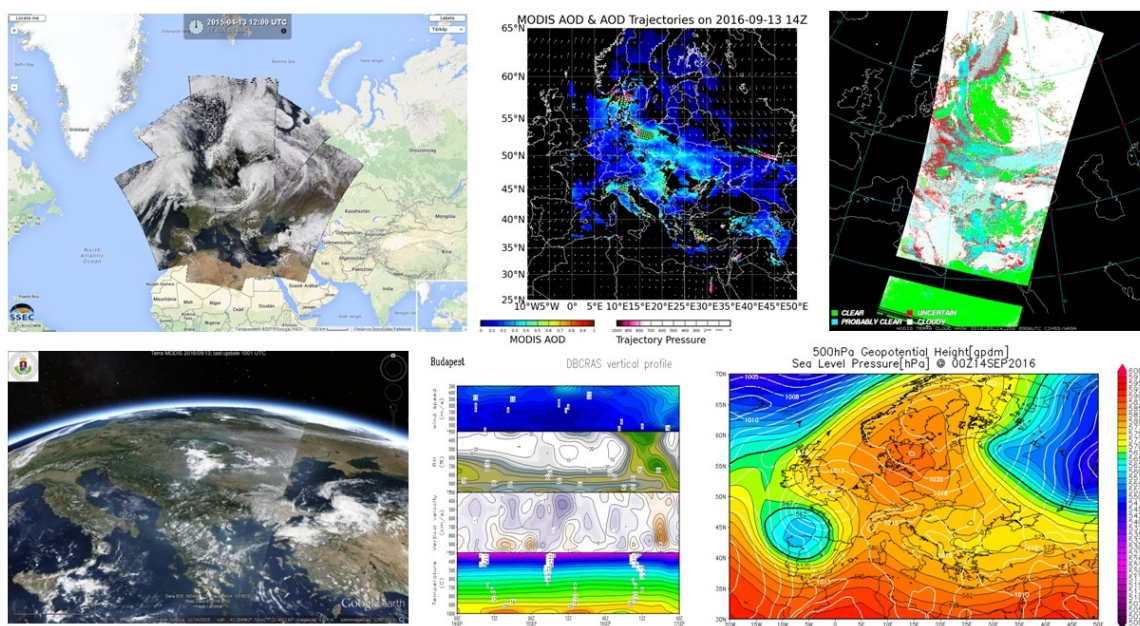
Saját vételű adatokon alapuló kutatásaink egyik fő célja, hogy a vett adatokból a növényzet állapotára, produktivására illetve fenológiai ciklusára jellemző információ kinyerjünk. A kutatócsoport által a vegetáció vizsgálatára irányuló kutatások a növényfejllettségi vizsgálatok (Kern et al., 2016b; 2017) mellett kiterjednek a mezőgazdasági haszonnövények termés-hozamának becslésére és előrejelzésére is (Bognár et al., 2017; Kern et al., 2018). Ehhez kiváló adatforrásnak számítanak a már említett AVHRR és MODIS szenzorok nagy térséget lefedő és hosszabb időszakra elérhető adatai.

Összetettebb vizsgálatokat végzünk a Kárpát-medence növényzetére vonatkozóan, ahol a fő kérdés annak a megértése, hogy miként befolyásolta az időjárás a térség növényzetének az állapotát az elmúlt időszakban. A vizsgálatok segítségével a növényzet fenológiai ciklusáról, produktivásáról és állapotáról, illetve az ezekben bekövetkezett változásokról kaphatunk objektív információt (Kern, 2015).

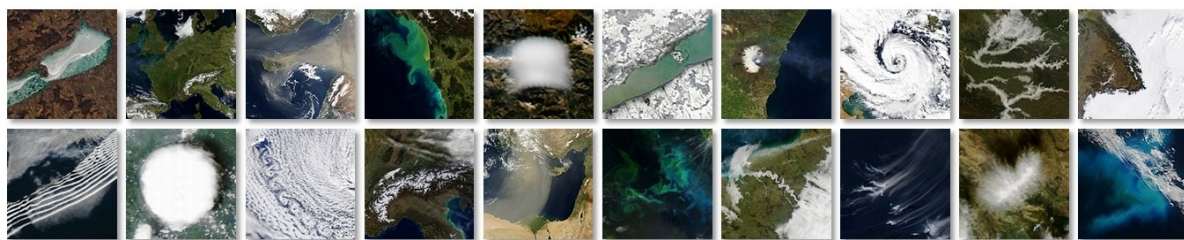
Valós idejű adatfeldolgozás

Tekintve, hogy a műholdak mindig az épp aktuálisan mért adatokat sugározzák ki folyamatos adatáram formájában, így azok közvetlen vétele esetén lehetőség van a felszín és a légkör valós idejű (ún. *real-time*) megfigyelésére is. A MODIS adatok valós idejű feldolgozása 2006 óta automatikusan és operatíván történik az ELTE-n (Kern et al., 2014, 2016a). Ennek megfelelően számos, a légkörre vonatkozó származtatott mennyiségeket állítunk elő, mint például az aeroszol optikai mélység, összetett felhőmaszk, a felhőtető hőmérséklete és nyomása, teljes kihullható vízgőz, stabilitási indexek, függőleges légoszlop ózontartalma, hőmérsékleti és nedvességi profilok, vízfelszínek hőmérséklete, stb. Ezenkívül a származtatott MODIS produktumok levegőtisztaság-előrejelző és időjárás előrejelző modellekben is felhasználásra kerülnek (Kern et al., 2016a).

Az ELTE vevőállomás által vett MODIS adatok valós idejű adatfeldolgozása során keletkező produktumok egy része az Interneten, az ELTE Meteorológiai Tanszék honlapján keresztül érhető el (<http://nimbus.elte.hu/kutatas/sat/modis.html>, például lásd a 3. és 4. ábrát).



3. ábra: Példák a valós idejű MODIS-adatfeldolgozás produktumaiból.



4. ábra: Részlet a valós színezésű MODIS képekből készített galériából.

Terveink szerint a Suomi-NPP és JPSS-1 műholdak adatainak hamarosan beinduló vétele tovább fogja bővíteni a valós idejű alkalmazások terét, így az Interneten is megtekinthető produktumok körét.

A valós idejű adatfeldolgozás számos környezeti paramétert számszerűsít, amelyek mind értékes hozzáadott információval szolgálnak a növényfenológiai és más, növényzettel kapcsolatos vizsgálatok vonatkozásában.

Összefoglalás

Az ELTE Űrkutató Csoportja a műholdas távérzékelés különböző területein végez kutatásokat, melyek részben a kiépített műholdvevő-állomás által vett adatokon alapszanak. A műholdvevő-állomás által vett adatok felhasználásra kerülnek az oktatásban is, és a hallgatók bekapcsolódhatnak a különböző kutatásokba is. A növényfenológiához kapcsolódó vizsgálatokat kiválóan egészítik ki a saját vételű adatok, amelyek révén naprakész adatokhoz jutunk a növényzet aktivitásáról és életjelenségeiről.

Rövidítések

AVHRR	– Advanced Very High Resolution Radiometer
EOS	– Earth Observing System
ETM+	– Enhanced Thematic Mapper Plus
GIMMS	– Global Inventory Modeling and Mapping Studies
MERIS	– MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MODIS	– MODerate resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	– Meteosat Second Generation
MSI	– MultiSpectral Instrument
NDVI	– Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	– National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	– National Polar-orbiting Partnership (korábban National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) Preparatory Project)
SeaWiFS	– Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SEVIRI	– Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager
SPOT	– Satellites Pour l'Observation de la Terre or Earth-observing Satellites
TM	– Thematic Mapper
VIIRS	– Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

Köszönetnyilvánítás

A kutatásokat az OTKA FK-128709 számú pályázata támogatja.
Köszönettel tartozunk kollégáinknak az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék Űrkutató Csoportjában az ELTE vevőállomás létrehozásáért és folyamatos fenntartásáért.

Hivatkozások

- Bognár, P., Kern, A., Pásztor, Sz., Lichtenberger, J., Koronczay, D., Ferencz, Cs., 2017: Yield estimation and forecasting for winter wheat in Hungary using direct broadcast MODIS data. *Int. J. Remote Sens.*, 38(11): 3394–3414, <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1295482>
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., Schwartz, M.D., 2007: Shifting plant phenology in response to global change. Review. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(7): 357–365, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Bognár, P., Molnár, G., Steinbach, P., Timár, G., 2003: Satellite receiving station at the Eötvös Loránd University, in Hungary. *Geodézia és Kartográfia*, 55: 30–33.
- de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M.E., Dent, D.L., 2011: Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sens. Environ.*, 115: 692–702. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.011>
- de Jong, R., Verbesselt, J., Schaepman, M.E., de Bruin, S., 2012: Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change. *Glob. Chang. Biol.*, 18: 642–655. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02578.x>
- Kern, A., Bognár, P., Pásztor, Sz., Timár, G., Lichtenberger, J., Ferencz, Cs., Steinbach, P., Ferencz, O., 2014: Közvetlen vételű MODIS adatok alkalmazásai Magyarország térségére. *RS & GIS - Távérzékelési, fotogrammetriai, térképészeti és térinformatikai szakfolyóirat*, IV/1: 5-13.
- Kern, A., 2015: A vegetáció megfigyelése az űrből. *Természet Világa*, 146(11)
- Kern, A., Bognár, P., Pásztor, Sz., Lichtenberger, J., Steinbach, P., Ferencz, Cs., 2016a: Műholdas távérzékelés az ELTE Űrkutató Csoportjában. In: *Kutatási és operatív feladatok meteorológusként. A Meteorológus TDK 2016. évi Nyári Iskola előadásainak összefoglalói. (Szerk: Pongrácz R., Mészáros R., Kis A.). Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, 27: 77–80.
- Kern, A., Marjanović, H., Barcza, Z., 2016b: Evaluation of the quality of NDVI3g dataset against Collection 6 MODIS NDVI in Central-Europe between 2000 and 2013. *Remote Sensing*, 8(11): 955, 30p. <https://doi.org/10.3390/rs8110955>
- Kern, A., Marjanović, H., Dobor, L., Anić, M., Hlásny, T., Barcza, Z., 2017: Identification of Years with Extreme Vegetation State in Central Europe Based on Remote Sensing and Meteorological Data. *South-east European Forestry (SEEFOR)*, 8(1): 1–20. <https://doi.org/10.15177/seefor.17-05>
- Kern, A., Barcza, Z., Marjanović, H., Árendás, T., Fodor, N., Bónis, P., Bognár, P., Lichtenberger, J., 2018: Statistical modelling of crop yield in Central Europe using climate data and remote sensing vegetation indices. *Agric. For. Meteorol.*, 260–261: 300–320, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.009>
- Menzel, A., Sparks, T., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Á., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.E., Zach, S., Zust, A., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.*, 12: 1969–1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani R.R., 1997: Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386: 698–702. <https://doi.org/10.1038/386698a0>

- Pinzon, J.E., Tucker, C.J., 2014: A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series. *Remote Sens.*, 6: 6929–6960. <https://doi.org/10.3390/rs6086929>
- Timár, G., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Kern, A., Molnár, G., Székely, B., Pásztor, Sz., 2006: MODIS-adatvétele az ELTE műholdvevő állomásán. *Geodézia és Kartográfia*, 58: 11–14.
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R.B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J.G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T.A.M., Stocker, B.D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S., Zeng, N., 2016: Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 6: 791–796. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
-

ORCID

Kern A.  <https://orcid.org/0000-0002-3504-1668>